선형 TPMACA의 0-tree의 0이 아닌 상태를 여원벡터로 갖는 셀룰라 오토마타*

조성진† · 김한두†† · 최언숙†††

요 약

본 논문에서는 선형 TPMACA C 의 0-tree에서 0이 아닌 상태를 여원벡터로 갖는 CA C′를 분석하여 C 의 모든 상태가 C′의 어느 곳에 있는지를 밝혔다. 또한 C 의 상태전이 그래프에서 한 경로만 알면 나머지 상태를 모두 알 수 있음을 밝혔다.

Cellular Automata with a Complemented Vector as a Non-zero State in the 0-tree of a Linear TPMACA*

Sung Jin Cho†, Han Doo Kim†† and Un Sook Choi†††

ABSTRACT

In this paper, we show the behaviors of all states in C and the states in C′, where C′ is a complemented cellular automata whose the complemented vector is a nonzero state in the 0-tree of a linear TPMACA C. Also we show that if we know a path in the state-transition graph of C, then we can know the behavior of all states in C.

1. 서 론

셀룰라 오토마타(Cellular Automata, 이하 CA)란 동역학계(dynamical system)를 해석하는 한 방법으로 공간과 시간을 이산적으로 다루고, 이산적인 공간을 셀룰라 공간(cellular space)의 기본 단위인 각 셀이 취할 수 있는 상태를 유한하게 처리하며, 각 셀들의 상태가 국소적인 상호작용에 의해서 동시에 갱신되는 시스템이다. Group CA의 상태전이 행동의 분석은 그동안 많은 연구가 이루어졌다[1,8,10,12]. CA의 전이행렬이 역행렬을 갖는 CA가 group CA이고 역행렬을 갖지 않는 CA가 nongroup CA이 이다. Group CA에 비하여 nongroup CA에 대한 연구는 그리 활발하지는 못하였으나 최근 해쉬함수 생성이나 암호, 부울 방정식의 해법, 논리회로의 검사 등에 응용이 되면서 관심을 받기 시작하였다[6,7,9,11]. 특히 multiple-attractor CA(이하 MACA)는 효과적인 해쉬함수 생성기임이 입증되었으며[8] 또한 두 개의 직전자(predecessor)를 갖는 single-attractor CA는 CA를 기반으로 한 완전해쉬함수(perfect hash function) 생성에 사용되어왔다. 본 논문에서는 셀들에 XOR 논리 대신 XNOR 논리를 적용함으로써 여원벡터(complemented vector)를 갖는 CA의 행동에 대한 자세한 분석을 제시한다. 또한 MACA의 셀들의 상태전이 함수를 전도함으로써 유도되는 여원을 갖는 CA의 상태전이 행동의 특징을 살펴본다. 특히 여원벡터 F가 0-tree에서 0이 아닌 상태일 경우의 여원을 갖는 CA의 행동을 밝히도록 한다. 2절에서는 선형 nongroup CA[3-5]의 정의와 간단한 성질들을 밝히고 3절에서는 선형 CA로부터 유도된 여원을 갖는 CA의 행동을 분석하고 4절에서 결론을 맺는다.

---

*본 논문은 2001 정보통신부 대학기초연구지원사업으로 수행되었음.

† 정회원, 부경대학교 수리과학부
†† 정회원, 인제대학교 컴퓨터응용과학부
††† 부경대학교 응용수학과

2. 선형 Nongroup CA의 정의 및 성질

이 절에서는 선형 nongroup CA의 정의와 3절에서 필요한 용어의 정의를 기술한다.

선형 nongroup CA(LNCA) : Nongroup CA에서 다음 상태를 결정짓는 상태전이 함수가 XOR 논리로만 이루어져 있어서 이 함수를 행렬로 표현할 수 있다. 이러한 CA를 선형 nongroup CA(이하 LNCA)라 한다.

특성다항식 : 주어진 CA의 전이행렬 T에 대하여 특성다항식(characteristic polynomial)은 $|T+xI|$이다.

최소다항식 : 특성다항식의 인수 중 T를 근으로 갖는 차수가 가장 낮은 다항식을 최소다항식(minimal polynomial)이라 한다.

Attractor : Nongroup CA의 상태전이 그래프에서 순환상태(cyclic state)들 중 사이클(cycle)의 길이가 1인 상태를 말한다.

참고1> Nongroup CA의 상태전이 그래프에서 길이가 2 이상인 사이클에 있는 상태는 attractor가 아니다.

r-직전자 : $T^rY = X$을 만족하는 상태 Y를 상태 X의 r-직전자(r-predecessor) ($1 \le r \le 2^n-1$)라 부른다. 특히 1-직전자를 간단히 직전자라 부른다.

Multiple-attractor CA(MACA) : 상태전이 그래프가 각 attractor를 root로 하는 서로 분리된 tree들로 구성된 nongroup CA를 ***MACA***라 부른다. 특히 직전자의 수가 2인 MACA를 ***TPMACA***라 부른다.

참고2> attractor의 수가 1인 MACA를 single-attractor CA(이하 ***SACA***)라 부르며 특히 직전자의 수가 2인 SACA를 ***TPSACA***라 부른다.

α-tree : 순환상태 α를 root로 하는 tree이다.

Depth : Nongroup CA의 상태전이 그래프에서 임의의 한 도달불가능한 상태에서 가장 가까운 순환상태로 가는데 걸리는 최소의 단계 수를 말한다.

Level : 어떤 상태 x가 α-tree의 level l($l \le$ depth)에 있다는 것은 상태 x가 정확히 l단계 후 상태 α가 되는 위치에 있다는 것이다. 즉, $T^px=\alpha$가 되는 p값 중 최소값이 l이다.

3. 선형 TPMACA로부터 유도된 여원을 갖는 CA의 행동

이 절에서는 선형 TPMACA로부터 유도된 여원을 갖는 CA의 행동을 분석한다. 특히 여원벡터 F가 0-tree에서 0이 아닌 상태일 경우 TPMACA로부터 유도된 여원을 갖는 CA의 행동을 밝히도록 한다.

보조정리1[11]> LNCA의 전이행렬이 T이고 그에 대응하는 여원을 갖는 CA에서 연산자 $\overline{T}$를 p번 적용한 것을 $\overline{T}^p$라 하자. 그러면
$\overline{T}^pf(x) = [I \oplus T \oplus T^2 \oplus \cdots \oplus T^{p-1}][F(x)] \oplus [T^p][f(x)]$이다. 여기서 $[F(x)]$는 XOR 논리를 적용한 후 전도를 취한 n차원 벡터(n은 셀의 개수)이다. $F(x)$는 XNOR 논리가 적용된 CA 셀의 위치의 성분이 1이다.(단, $\oplus$는 비트단위 덧셈 연산이다)

보조정리2> LNCA의 전이행렬이 T이고 그에 대응하는 여원을 갖는 CA에서 연산자 $\overline{T}$를 p번 적용한 것을 $\overline{T}^p$라 하자. 그러면

$$\overline{T}^pF(x) = [I \oplus T \oplus T^2 \oplus \cdots \oplus T^{p-1} \oplus T^p][F(x)]$$

<증명> 보조정리 1>로부터 명백하다.□

보조정리3> C는 depth가 d인 TPMACA이고, C에서 0-tree의 level i ($0 < i \le d$)에 있는 상태 F를 여원벡터로 택하자. 그러면 $\overline{T}^{i-1}F$는 C에 대응하는 여원을 갖는 CA C′에서 attractor이다.

<증명> F가 0-tree의 level i의 상태이므로 $T^iF = 0$이다. $S = \overline{T}^{i-1}F$라 하자. 그러면 보조정리 2>에 의하여

$$S = (T^{i-1} \oplus T^{i-2} \oplus \cdots \oplus I)F$$

이다. 그러므로

$$\overline{T}S = TS \oplus F$$

$= T(T^{i-1} \oplus T^{i-2} \oplus \cdots \oplus I)F \oplus F$
$= (T^i \oplus T^{i-1} \oplus \cdots \oplus I)F$
$= T^iF \oplus (T^{i-1} \oplus \cdots \oplus I)F$
$= 0 \oplus S = S$

따라서 S는 C′에서 attractor이다.□

정리1> TPMACA C 에 대응하는 여원을 갖는 CA C′의 상태전이 그래프에서 임의의 도달가능한 상태의 서로 다른 두 직전자의 합은 C 의 상태 0의 0이 아닌 직전자이다.

<증명> x_i와 y_i를 C′의 임의의 도달가능한 상태의 서로 다른 두 직전자라 하자. 그러면

$\overline{T}x_i = \overline{T}y_i$
$\Rightarrow Tx_i \oplus F = Ty_i \oplus F$
$\Rightarrow Tx_i \oplus F \oplus Ty_i \oplus F = 0$
$\Rightarrow T(x_i \oplus y_i) = 0$ and $x_i \oplus y_i \neq 0$
($x_i \neq y_i$ 이므로)

그러므로 $x_i \oplus y_i$는 C 의 상태 0의 0이 아닌 직전자이다. □

정리2> C 가 TPMACA이고 C 에 대응하는 여원을 갖는 CA를 C′이라 하자. 여원벡터 F를 C 의 0-tree의 level l에 있는 비순환상태로 택하자. 그러면 다음이 성립한다.

(a) C 에서 l보다 더 큰 level에 있는 모든 상태는 C′에서 변하지 않는다.

(b) C 에서 level l에 있는 모든 상태는 C′에서 l보다 작은 level에 배열된다.

(c) C 에서 l보다 작은 level에 있는 모든 상태는 C′에서 level l에 배열된다.

(d) 상태 F는 C′에서 level $l-1$ 에 배열된다.

<증명> F가 0-tree의 level l의 상태이므로 $T^lF = 0$이다.

(a) x를 C 의 상태전이 그래프에서 level $k(> l)$에 있는 상태라 하자. 그러면

$\overline{T}^k x$
$= T^k x \oplus (T^{k-1} \oplus \cdots \oplus T^l \oplus T^{l-1} \oplus \cdots \oplus T \oplus I)F$
$= T^k x \oplus (T^{l-1} \oplus \cdots \oplus T \oplus I)F$
(모든 $i > l-1$에 대하여 $T^iF = 0$이므로)
$= 0 \oplus (T^{l-1} \oplus \cdots \oplus T \oplus I)F$
(x가 level $k(> l)$의 상태이므로)
$= T^{l-1}F \oplus (T^{l-2} \oplus \cdots \oplus T \oplus I)F$
$= \overline{T}^{l-1}F$

이 성립한다.

또한 보조정리 3>에 의하면 $\overline{T}^{l-1}F$이 C′의 attractor이므로 x의 level은 기껏해야 k이다. 한편,

$\overline{T}^{k-1}x$
$= T^{k-1}x \oplus (T^{k-2} \oplus \cdots \oplus T^l \oplus T^{l-1} \oplus \cdots \oplus T \oplus I)F$
$= T^{k-1}x \oplus \overline{T}^{l-1}F$

에서 $T^{k-1}x \neq 0$이므로 $T^{k-1}x \oplus \overline{T}^{l-1}F$은 C′에서 attractor가 아니다.

따라서 x의 level은 정확히 k이다.

(b) z를 C 에서 level l에 있는 상태라 하자. 도달가능한 상태의 직전자의 수는 2이므로

$T^{l-1}z = T^{l-1}F$ 와 $T^lz = T^lF = 0$

이 성립한다. 한편,

$\overline{T}^{l-1}z = T^{l-1}z \oplus (T^{l-2} \oplus \cdots \oplus T \oplus I)F$
$= T^{l-1}F \oplus (T^{l-2} \oplus \cdots \oplus T \oplus I)F$
$= \overline{T}^{l-1}F$

이고 $\overline{T}^{l-1}F$이 C′의 attractor이므로 z의 level은 기껏해야 $l-1$이다.

(c) w를 C 에서 l보다 작은 level에 있는 상태라 하자. 그러면 $T^lw = T^{l-1}w = 0$이다. 그리고

$\overline{T}^l w = T^l w \oplus (T^{l-1} \oplus \cdots \oplus T \oplus I)F$
$= T^l w \oplus \overline{T}^{l-1}F$
$= \overline{T}^{l-1}F$

와

$\overline{T}^{l-1}w = T^{l-1}w \oplus (T^{l-2} \oplus \cdots \oplus T \oplus I)F$
$= \overline{T}^{l-2}F$
$\neq \overline{T}^{l-1}F$

이 성립한다.

$\overline{T}^{l-1}F$ 은 C′의 attractor이지만 $\overline{T}^{l-2}F$은 C′의 attractor가 아니므로 w는 level l에 배열된다.

(d) (c)에 의하면 상태 0은 C′에서 level l에 있다. $\overline{T}0 = T0 \oplus F = F$이므로 F는 level $l-1$에 배열된다. □

정리3> T가 TPMACA C의 전이행렬이고 C에 대응하는 여원을 갖는 CA를 C′이라 하자. F를 C의 0-tree의 도달불가능한 상태라 하자. 그러면 상태 0은 C′의 상태전이 그래프에서 도달불가능한 상태이다.

<증명> F를 C의 0-tree에서 level l의 상태라 하자. 그러면 정리 2(d)에 의하여 F는 C′의 level $l-1$에 배열되므로 $\overline{T}0 = T0 \oplus F = F$이다. 따라서 0은 level l에 놓이므로 상태 0은 도달불가능한 상태이다.□

정리4[2]> n-셀 TPSACA의 depth는 n이다.

정리5> C를 n-셀 TPSACA라 하자. 그러면 C의 최소다항식은 $m(x) = x^n$이다.

<증명> 정리 4>에 의하면 x^n은 $m(x)$를 나누므로 $m(x) = x^n(x+1)^k$ (k는 정수) 이 성립한다. 전이행렬 T의 특성다항식의 차수가 n이므로 $k = 0$이어야 한다. 따라서 $m(x) = x^n$이다.□

그림 1은 TPMACA의 예이다. 4개의 셀로 이루어진 CA에 적용된 rule이 <102, 102, 60, 60>이고 전이행렬 T는 다음과 같다.

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

이때 최소다항식은 $m(x) = x^2(x+1)$이고 attractor는 0, 1, 8 그리고 9이다. 여원벡터를 level 2에 있는 비순환상태 $F = (1010)^T$로 택하면 $\overline{T}F$는 C'에서 attractor이다(보조정리 3). C에서 level 2에 있는 모든 상태는 C'에서 2보다 작은 level에 배열되었고(정리 2의 b), C에서 2보다 작은 level에 있는 모든 상태는 C'에서 level 2에 배열되었으며(정리 2의 c), 상태 F는 C'에서 level 1에 배열되었다(정리 2의 d). 한편, C'에서 상태 2의 두 직전자 8과 7의 합은 C의 상태 0의 0이 아닌 직전자인 15이다(정리 1).

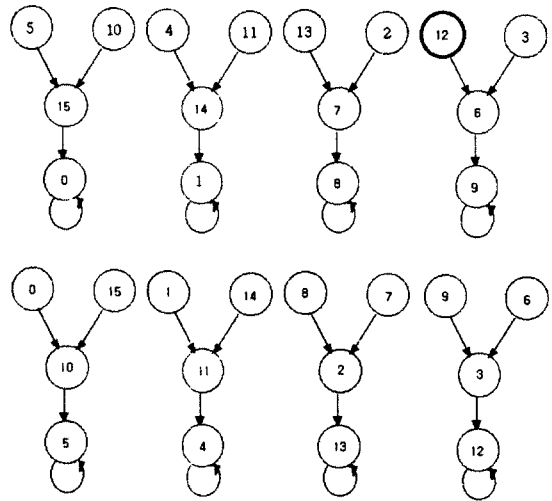



그림 1. C와 C′의 상태전이 그래프

정리6[2]> C를 TPSACA라 하자. C의 상태전이 그래프에서 $S_{l,k}$를 level l에서 $(k+1)$번째 상태라 하면 다음 식이 성립한다:

$$S_{l,k} = S_{l,0} \oplus \sum_{i=1}^{l-1} b_i S_{i,0}$$

여기서 $b_{l-1} b_{l-2} \cdots b_1$은 k의 이진법 표현의 수이고 k의 최대값은 $2^{l-1}-1$이다.

정의 1> C가 TPMACA이고 C의 depth는 d라 하자. β를 C에서 α-tree의 도달불가능한 상태라 하자. 그러면

$$\beta \rightarrow T\beta \rightarrow \cdots \rightarrow \alpha$$

를 C에서 α-tree의 α-기본경로(α-basic path)라 부른다.

참고3> C가 정리 6>에서와 같고, depth가 d라 하자. 그러면

$$S_{d,0} \rightarrow S_{d-1,0} \rightarrow \cdots \rightarrow S_{1,0} \rightarrow 0$$

은 C에서 0-tree의 0-기본경로이다.

보조정리4[6]> 상태 0의 직전자의 수가 r일 때, $P_{i,j}$를 0-tree의 level i의 j번째 상태라 하고, R_i를 상태 X의 순환하는 i-직전자라 하자. 그리고 $X_{i,j}$를 X-tree의 level i의 j번째 상태라 하면 $X_{i,j}$는 다음을 만족한다.

$X_{i,j} = R_i \oplus P_{ij}$

(단, $\oplus$는 비트단위 덧셈연산, $1 \le i \le$ depth, $j = 1, \cdots, (r-1)r^{i-1}$).

보조정리5> C를 TPMACA라 하자. $\alpha_{i,j}$ (resp. $\beta_{i,j}$)를 C에서 α-tree (resp. β-tree)의 level i에 있는 j번째 상태라 하면

$$\alpha_{i,j} \oplus \beta_{i,j} = \alpha \oplus \beta$$

가 성립한다.

<증명> $P_{i,j}$를 0-tree의 level i에 있는 j번째 상태라 하자. 그러면 보조정리4>에 의하여

$\alpha_{i,j} = P_{i,j} \oplus \alpha$, $\beta_{i,j} = P_{i,j} \oplus \beta$

이므로

$$\alpha_{i,j} \oplus \beta_{i,j} = P_{i,j} \oplus \alpha \oplus P_{i,j} \oplus \beta$$

이 성립한다. 따라서

$$\alpha_{i,j} \oplus \beta_{i,j} = \alpha \oplus \beta$$ 이다.□

보조정리 5>로부터 다음 따름정리를 얻는다.

따름정리1> C를 두 개의 직전자를 갖는 depth가 d인 TPMACA라 하고 T를 C의 전이 행렬이라 하자. 만일

$$S_{d,0} \rightarrow S_{d-1,0} \rightarrow \cdots \rightarrow S_{1,0} \rightarrow 0$$

이 C에서 0-tree의 0-기본경로이면

$$(S_{d,0} \oplus \alpha) \rightarrow (S_{d-1,0} \oplus \alpha) \rightarrow \cdots \rightarrow (S_{1,0} \oplus \alpha) \rightarrow \alpha$$

은 C에서 α-tree의 α-기본경로이다.

<증명> 보조정리 4>에 의하여

$S_{i,0} \oplus (S_{i,0} \oplus \alpha) = 0 \oplus \alpha = \alpha$ 이므로

$$(S_{d,0} \oplus \alpha) \rightarrow (S_{d-1,0} \oplus \alpha) \rightarrow \cdots \rightarrow (S_{1,0} \oplus \alpha) \rightarrow \alpha$$

은 C에서 α-tree의 α-기본경로이다. □

다음 정리는 정리 6>의 확장이다.

정리7> C를 TPMACA라 하자. C의 상태전이 그래프에서 $S^{\alpha}_{l,k}$(resp. $S_{l,k}$)를 C에서 α-tree (resp. 0-tree)의 level l에서 $(k+1)$번째 상태라 하면 다음 식이 성립한다:

$$S^{\alpha}_{l,k} = S^{\alpha}_{l,0} \oplus \sum_{i=1}^{l-1} b_i S_{i,0}$$

여기서 $b_{l-1} b_{l-2} \cdots b_1$ 은 k의 이진법 표현의 수이고 k의 최대값은 $2^{l-1}-1$ 이다.

<증명> 보조정리 4>에 의하여

$S^{\alpha}_{l,k} \oplus \alpha = S_{l,k}$. 그러므로

$$S^{\alpha}_{l,k} = \alpha \oplus S_{l,k} = (\alpha \oplus S_{l,0}) \oplus \sum_{i=1}^{l-1} b_i S_{i,0}$$

(보조정리 5>에 의하여)

$$= S^{\alpha}_{l,0} \oplus \sum_{i=1}^{l-1} b_i S_{i,0} \text{ . } \square$$

그림 2는 TPMACA의 예이다. 5개의 셀로 이루어진 CA에 적용된 rule이 <204, 240, 240, 240, 240>이고 전이행렬 T는 다음과 같다.

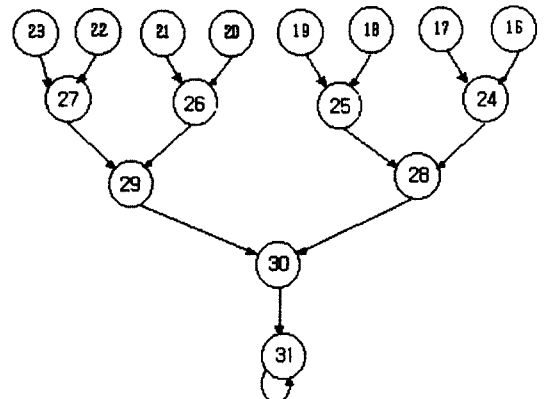
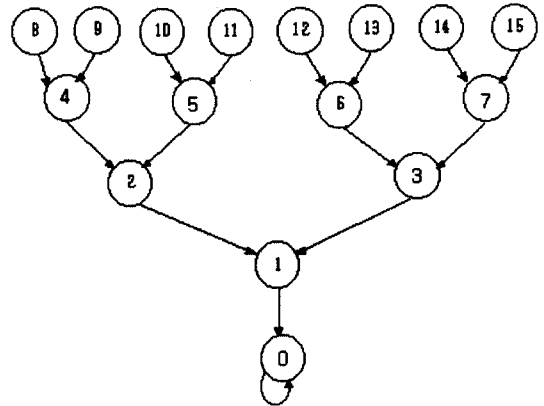



그림 2. C의 상태전이 그래프

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

이때 최소다항식은 $m(x) = x^4(x+1)$이고 attractor는 0과 31이다. 여기서 $8 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 0$은 0-기본경로이고, 이 0-기본경로에 대응하는 31-기본경로는 따름정리1>에 의하여 $23 \rightarrow 27 \rightarrow 29 \rightarrow 30 \rightarrow 31$이다. 또한 정리7>에 의하여 31-기본경로로부터 31-tree의 나머지 상태들을 모두 알 수 있어서 31-tree를 구할 수 있다.

4. 결 론

선형 TPMACA C 의 0-tree의 0이 아닌 상태를 여원벡터로 갖는 CA C′를 분석하여 C 의 모든 상태가 C′의 어느 곳에 있는지를 밝혔다. 또한 C 의 상태전이 그래프에서 0-tree의 기본경로만 알면 나머지 $\alpha(\neq 0)$-tree의 기본경로를 알 수 있으며 $\alpha(\neq 0)$-tree의 기본경로를 이용하여 $\alpha(\neq 0)$-tree를 얻을 수 있음을 보였다. 본 연구결과는 CA를 이용한 완전해쉬함수 생성에 관한 연구에 도움이 되리라 사료된다.

참 고 문 헌

[1] P.H. Bardell, "Analysis of cellular automata used as pseudorandom pattern generators", *Proc. IEEE int. Test. Conf.*, 1990, pp. 762-767.

[2] S. Bhattacharjee, U.Raghavendra, D.R. Cowdhury and P.P. Chaudhuri, "An efficient encoding algorithm for image compression hardware based on Cellular Automata", *High Performance computing 1996, Proc. IEEE 3rd International conf.,* 1996, pp. 239-244.

[3] S. Bhattacharjee, S. Sinha, C. Chattopadhyay and P.P. Chaudhuri "Cellular automata based scheme for solution of Boolean equations", *IEEE Proc.-Comput. Digit. Tech*, **Vol. 143, No. 3**, 1996, pp. 174~180.

[4] S. Chattopadhyay, *Some studies on Theory and Applications of Additive Cellular Automata*, Ph.D. Thesis, I.I.T., Kharagpur, India, 1996.

[5] S. Chakraborty, D.R. Chowdhury and P.P. Chaudhuri, "Theory and Application of nongroup cellular automata for synthesis of easily testable finite state machines", *IEEE. Trans. Computers*, **Vol. 45, No. 7**, 1996, pp. 769-781.

[6] S.J. Cho, U.S. Choi and H.D. Kim, "Some properties of one dimensional linear nongroup cellular automata over GF(2)", J. Korea Multimedia Soc., **Vol. 4, No. 1,** 2001, pp. 91-95.

[7] P.P. Chaudhuri, D.R. Chowdhury, S. Nandy and S. Chattopadhyay, *Additive Cellular Automata Theory and Application*, **1**, IEEE Computer Society Press, California, 1997.

[8] A.K. Das and P.P. Chaudhuri, "Efficient characterization of cellular automata", *Proc. IEE(Part E)*, **Vol. 137, No. 1**, 1990, pp. 81-87.

[9] A.K. Das and P.P. Chaudhuri, "Vector space theoretic analysis of additive cellular automata and its application for pseudo-exhaustive test pattern generation", *IEEE Trans. Comput.*, **Vol. 42**, 1993, pp. 340-352.

[10] S. Nandi and P.P. Chaudhuri, "Analysis of Periodic and Intermediate Boundary 90/150 Cellular automata", *IEEE Trans. Computers*, **Vol. 45, No 1**, 1996, pp. 1-12.

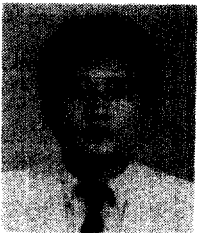
[11] S. Nandi, B.K. Kar and P.P. Chaudhuri, "Theory and Application of Cellular Automata in Cryptography", *IEEE Trans. Computers*, **Vol. 43**, 1994, pp.1346-1357.

[12] M. Serra, T. Slater, J.C. Muzio and D.M. Miller, "The analysis of one dimensional linear cellular automata and their aliasing properties", *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, **Vol. 9,** 1990, pp. 767-778.

조 성 진

1979년 강원대학교 수학교육과 (이학사)
1981년 고려대학교 수학과 대학원 (이학석사)
1988년 고려대학교 수학과 대학원 (이학박사)
1988년~현재 부경대학교 자연과학대학 수리과학부 재직(교수)
관심분야 : Cellular Automata론, ATM, Queueing론

최 언 숙

1992년 성균관대학교 산업공학과 (공학사)
2000년 부경대학교 자연과학대학 응용수학과 대학원(이학석사)
2000년~현재 부경대학교 자연과학대학 응용수학과 대학원(박사과정) 재학중
관심분야 : Cellular Automata론, ATM, Queueing론

김 한 두

1982년 고려대학교 수학과(이학사)
1984년 고려대학교 수학과 대학원 (이학석사)
1988년 고려대학교 수학과 대학원 (이학박사)
1989년~현재 인제대학교 자연과학대학 컴퓨터 응용과학부 재직(부교수)
관심분야 : 전산수학, Cellular Autoa론